

区块链增强的低空物联网可信协作架构及集群构建策略

乐煜炜^{1,2}, 江锐¹, 江毅恒¹, 王家恒^{1,2}

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 南京 211189; 2. 网络通信与安全紫金山实验室, 南京 211111)

摘要: 低空生态的繁荣不断推动智能网络服务由平面向低空三维立体方向转变, 低空业务呈现出规模化、协同化和智能化等演进态势, 对低空物联网跨域设备协作能力、任务处理效率、数据安全性及操作可信性等提出了较严苛要求。集群式多设备联合计算协作可提升低空物联网中复杂化大规模任务的处理效率, 然而现有模式仍存在跨域设备协作困难、安全可信性缺乏保障以及资源调度灵活性不足等问题。区块链具有数据及操作不可篡改、公开透明和集体维护等特性, 尤为适合在多方参与的低空智联环境中建立高效协作信任。本文提出区块链增强的低空物联网可信协作架构, 为低空多源异构智联设备提供链上跨域协作计算与状态同步渠道, 并设计深度融合集群任务处理流程的多级共识协议, 保障低空物联网协作集群式计算服务的安全性及可信性。针对低空物联网中协作集群链上同步状态的时效性开展分析, 并据此提出一种基于排队模型的低空智联协作节点链上状态修正算法与高效集群构建策略, 保障链上协作任务处理效率。仿真结果表明所提架构及方案可有效提升低空物联网中协作任务处理效率和资源利用率等性能。

关键词: 区块链; 低空物联网; 共识协议; 排队模型; 信息年龄

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A

Blockchain-Enhanced Trustworthy Collaboration Architecture and Cluster-Forming Strategy for Low-Altitude Intelligent Network

LE Yuwei^{1,2}, JIANG Rui¹, JIANG Yiheng¹, WANG Jiaheng^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

Abstract: The prosperity of the low-altitude ecology has continuously promoted the transformation of intelligent network services from the terrestrial to the low-altitude airspace. Low-altitude services and applications have become large-scale, collaborative, and intelligent. These trends have put forward extreme requirements for cross-domain collaboration capabilities, processing efficiency, and the security and trustworthiness of data and operations. Low-altitude intelligent network cluster collaboration using multi-device joint computing can improve the processing efficiency of complex and large-scale tasks in low-altitude intelligent networks. However, the existing schemes still have problems such as lack of cross-domain collaboration, deficiency in security and trustworthiness, and insufficient flexibility in centralized

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键核心技术)重点项目(BE2022068-3); 国家自然科学基金(U22B2006); 江苏省前沿引领技术基础研究重大项目(BK20222001, BK20212001); 中央高校基本科研业务费专项资金(2242022K60002, 2242023K5003)。

收稿日期: 2023-12-16; **修订日期:** 2024-01-11

resource scheduling. Blockchain has the characteristics of immutability, openness, transparency, and collective maintenance, which is suitable for establishing efficient collaborative trust. This paper proposes a blockchain-enhanced trustworthy collaboration architecture for low-altitude intelligent network to provide on-chain cross-domain collaborative computing and trusted status synchronization services among heterogeneous low-altitude intelligent devices. We also design a multi-level consensus protocol to ensure the security and trustworthiness during the collaborative computation process. And we further analyze the freshness of the on-chain status, and propose an on-chain state correction algorithm and an efficient cluster-forming strategy for low-altitude intelligent nodes based on a queueing model. The simulation results show that the proposed architecture and protocol can improve the overall performance in terms of collaborative processing efficiency and network resource utilization.

Key words: blockchain; low-altitude intelligent network; consensus protocol; queueing model; age of information

引 言

低空物联网作为传统物联网在空天地海多维基础设施上的创新性延伸,是空天地一体化网络的重要组成部分^[1]。它以广覆盖、无盲区和高可用性的特点,推动智能网络服务由平面向低空三维立体的方向转变,是支撑未来B5G和6G移动网络通信技术发展的关键技术之一^[2-4]。低空物联网中的网络设施包括低空飞行器、传感器网络、移动基站、地面控制中心和云数据平台等多类型设备,共同构建高动态自适应网络。随着移动通信技术及低空智联设备的发展,低空业务及应用呈现出多样化、规模化、协同化、智能化和绿色化等演进态势。除了简单的数据采集传输任务,低空智联设备对于实时飞行路线规划、图像识别及空中地形建模等复杂业务及应用的需求也不断攀升,对低空物联网跨域设备协作能力、联合任务处理效率、全域数据与操作的安全性及可信性等提出了极高要求。因此,应用集群式协作完成并行高效的计算任务已逐渐成为低空智联设备扩展算力、提高实时性和安全性的关键技术手段。

低空物联网集群式协作通过低空智联设备形成自组织对等网络,使得复杂任务能够分散在网络中的对等节点上协作并行处理,能够支撑如无人机目标跟踪与地形勘探建模等资源密集型低空智联任务,提高了低空智联任务处理效率^[5-6]。此外,协作集群还具备处理高密度网络连接和大数据流量的能力,能够保证低空物联网在不断增长的设备和数据需求下稳定运行。然而,虽然传统集群式协作已逐渐成熟并广泛应用在低空物联网架构中,但其仍面临跨域、跨运营商、跨制造商设备间协作困难,集群协作安全可信流程缺乏底层保障,集中资源调度灵活性不足等问题^[7-9]。区块链技术能够为低空智联集群式协作环境引入公开透明、不可篡改、多方维护和智能执行等特性^[10],非常适合在缺乏信任环境中为多运营商、多空域和多智能域下的协作任务参与者建立高效协作信任,保障低空智联协作过程安全可信,提升协作集群任务处理效率^[11-13]。

本文提出一种区块链增强的低空物联网可信协作架构,并设计深度融合集群任务处理流程的多级共识协议,为低空多源异构智联设备提供链上跨域协作计算与状态同步渠道。同时,对链上大量状态数据传递引发的服务状态报告“过时”现象开展多维分析,深入研究协作集群链上同步状态的时效性问题。最后,针对上述问题提出基于排队模型的低空智联协作节点链上状态修正算法与高效集群构建策略。本文的具体研究工作及创新点如下:

(1)提出了一种区块链增强的低空物联网可信协作架构,为低空多源异构智联设备提供链上跨域协作计算与状态同步渠道;设计一种多级区块链共识协议,在区块链流程不引入额外操作、时延开销的

情况下,应用区块链机制保障集群边缘协作任务执行过程的可信性及安全性。

(2)通过分析低空智链节点链上服务状态信息年龄(Age of information, AoI),引入了服务质量摘要的链上“过时”概念,并提出基于AoI以及直接估计的任务开始前等候时长预测量;通过对两种任务开始前等候时长的关系分析,提出基于服务状态信息年龄的状态时效性,并对其与低空智联可信协作计算效率关联性进行分析。

(3)为降低协作任务的开始前等候时长,提出一种链上状态修正算法(On-chain status correction algorithm, OSCA),该算法能够根据AoI及链上服务质量摘要,预测低空智联任务分片开始计算前的所需等候时长,有效提升低空智联协作集群任务处理效率。

(4)通过仿真验证所提协作架构及OSCA的有效性,及其对低空智能网中协作集群式任务处理服务效率、网络资源利用率等性能的影响。

1 区块链增强的低空智能网可信协作架构

针对低空智能网特性及安全可信的发展需求,本文设计一种区块链增强的低空智能网可信协作架构,如图1所示。该架构深度融合区块链不可篡改、全程可溯、多方维护及可信协作的特性,将区块链核心模块部署于来自多类型、多模态、多配置、多制造商和多管理方的低空飞行器、空地传感器、地面基站以及边缘服务器等低空智能网设备中,利用区块链组建形成能够安全高效处理大规模密集任务的低空智能网链上可信协作计算集群。在本架构中,所有部署了区块链模块的低空智联设备也可被称作区块链低空智联节点(Blockchain low-altitude intelligent node, BLIN)。BLIN可根据自身实际情况选择是否参与区块链维护,如超大型无人机和地面基站等BLIN可参与区块链维护、发起链上协作计算请求、负责协作计算集群构建及具体的计算过程;而例如超小型飞行器能力较弱的BLIN可仅作为低空智能网中的区块链一般用户,当有复杂任务需求时向其他参与区块链维护的BLIN发起协作请求。具体来说,区块链通过以下方式建立BLIN之间的可信安全协作关系:

(1)实现低空智能网中的可信链上信息共享:所有BLIN的信息可以通过带有独特签名的智能合约在链上进行多方共享。共享信息的真实性及可信性可由网络中的所有参与节点快速验证。

(2)在链上同步最新可靠的BLIN状态:BLIN的任务处理进度状态报告可通过区块链在BLIN间定期同步,由区块链保障这些状态报告的安全性与可靠性,对协作集群服务决策至关重要。

(3)实现协作任务处理数据及进程的链上可信追踪:区块链用于记录低空智联任务数据的摘要、服

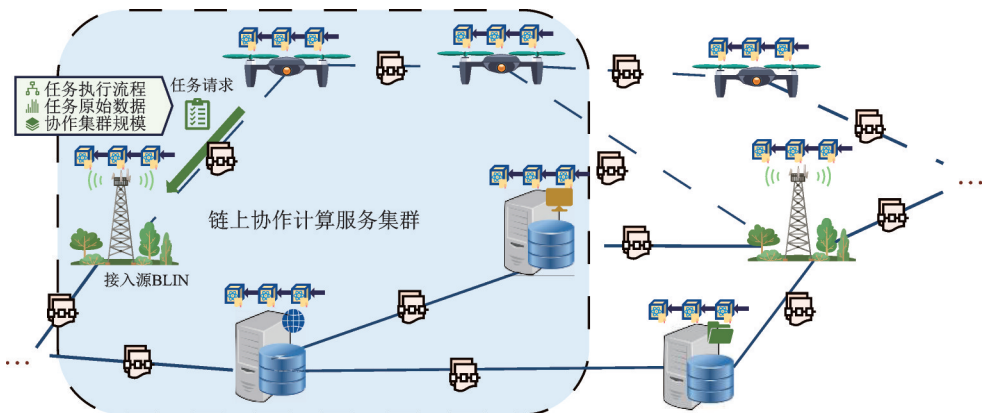


图1 区块链增强的低空智能网可信协作架构

Fig.1 Blockchain-enhanced trustworthy low-altitude intelligent network collaboration architecture

务集群构成及任务分配等信息,这些信息可在整个低空智联区块链网络的BLIN节点间同步与验证。

(4) 在链上实现公平可信的低空智联协作任务计算收益分配:基于链上共享信息,区块链可自动核算每个协作BLIN节点工作量,并将公开可验证的收益自动转移至BLIN所属运营方的链上账户。

举例来说,在所提出的区块链增强的低空智联可信协作架构下,若某一低空智联无人机需预测某空域一段时间内的飞行气象条件并进行航迹规划,其可向任意一个部署了区块链模块的BLIN发出协作计算任务请求,该请求需包括详细任务处理过程、待处理原始数据和任务协作集群规模等相关需求。随后,该接入源BLIN将负责解析请求,并选择符合任务需求的BLIN以构建链上协作计算服务集群,随后根据集群中BLIN的计算能力对任务进行分片分发。这一集群构建过程均由区块链模块完成,该模块可根据任务需求“无差别”式地选择来自多制造商或管理方的、支持多种模态的、拥有不同配置的多类型BLIN,从而为低空智联大规模、高密度等类型任务提供可信安全、高效响应、联通协作的处理渠道。

2 低空智联可信协作多级共识协议

针对区块链增强的低空智联可信协作架构,本文提出一种深度融合集群任务处理流程的多级共识协议。此多级共识协议主要包含上、下两层区块链共识,整合协作集群选取、任务分片分配、并行任务执行以及任务合并过程,并使前述流程取代原生区块链消息验证过程。同时,协议引入区块链特性保障BLIN协作任务处理安全可信,并能够减少区块链增强协作集群功能所产生的各项支出。

多级共识协议的下层主要采用协作实用拜占庭容错(Collaborative processing-practical Byzantine fault tolerance, CP-PBFT)共识,利用架构中业务的单一特性,协调协作集群以同步完成协作任务,从而有效降低了上链的等待时间。在收到新的协作计算任务请求后,接入源BLIN将会响应请求并启动下层共识流程。CP-PBFT共识协议流程如图2所示,具体如下:

(1) 任务分片分配:假设第 p 个协作集群 $C_p = \{N_{p,1}, N_{p,2}, \dots, N_{p,k}\}$ 中的接入源BLIN(假设为 $N_{p,q}$)负责执行分片操作,每个任务分片包含相应BLIN所需执行的部分操作程序和原始数据。随后,这些任务分片被 $N_{p,q}$ 派发给协作集群内的其余 $k-1$ 个BLIN。

(2) 分片摘要交换:集群中其余 $k-1$ 个合作BLIN对其收到的任务分片生成哈希摘要,这些BLIN会附上自己的电子签名,并与集群内其他BLIN交换这些含签名的摘要。 C_p 中除了 $N_{p,q}$ 的其他BLIN收到对应任务分片后,将分片哈希值与数字签名打包,与其他每个BLIN再次进行交换。

(3) 共识验证: C_p 内所有 k 个BLIN广播在共识阶段2中收到的所有任务分片摘要及电子签名,以确认所有BLIN任务分配的一致性 & 完整性。在投票阶段,如果异常BLIN数量超过 $(k-1)/3$,本次

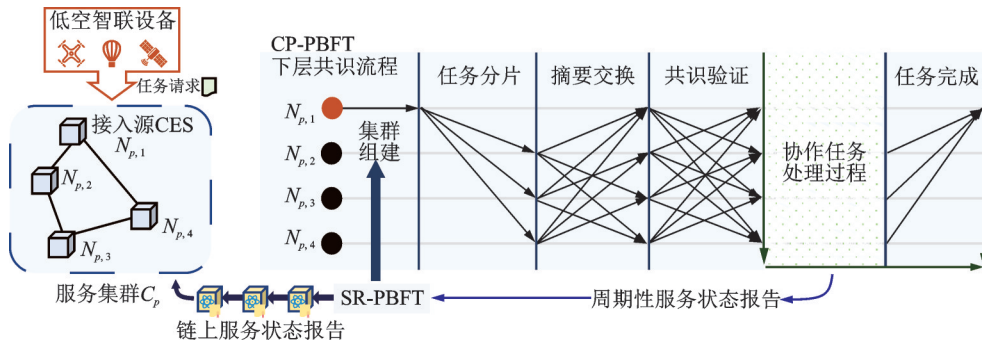


图2 下层CP-PBFT共识协议流程

Fig.2 Lower-layer CP-PBFT consensus protocol

CP-PBFT 共识协议流程需重新启动。

(4) 完成协作任务:共识验证阶段完成后,正式进入协作任务部署阶段。在本阶段内, C_p 内的所有 BLIN 需要每隔约 t_b 秒提交一次服务质量摘要至上层共识协议。在所有任务分片完成后,接入源 BLIN 将收集任务反馈,整合后向低空智联设备返回最终的任务处理结果。本轮次 CP-PBFT 共识协议正式结束。

多级共识协议上层主要应用状态报告实用拜占庭容错(Status report-practical Byzantine fault tolerance, SR-PBFT)共识协议,与 CP-PBFT 共识协议并行执行,其目的在于处理 CP-PBFT 中协作任务部署阶段产生的服务质量摘要。SR-PBFT 共识协议流程如图 3 所示,其中 SR-PBFT 共识协议轮次编号记为 $z \in \mathbf{Z}_+$,共识协议触发时间大约与服务质量摘要生成周期相同,记为 t_b 秒触发一轮。流程具体为:

(1) 在第 z 轮 SR-PBFT 共识协议中,假设第 p 个协作集群 $C_p = \{N_{p,1}, N_{p,2}, \dots, N_{p,k}\}$ 中的 k 个 BLIN 分别在 $S_{p,1,z}, S_{p,2,k}, \dots, S_{p,k,z}$ 时间点生成 k 份服务质量摘要。协作集群 C_p 中随机产生一位领导 BLIN,负责收集集群中的 k 份服务质量摘要并验证其真实性。

(2) 在由 h 个领导 BLIN 组成的 SR-PBFT 共识网络中,将随机选出一位领导 BLIN,该 BLIN 负责将收到的 h 份服务质量摘要打包形成一个记录区块,并启动 PBFT 共识流程以验证该记录区块。该记录区块通过验证上链后会在 h 个领导 BLIN 中分别存储,完成本步骤后轮次索引 z 将递增。

(3) 协作集群 C_p 中区块链低空智联节点 $N_{i,1}$ 从记录区块中获取所有服务质量摘要,并向下一协作集群 C_i 中所有 BLIN 广播。随后, C_i 中的所有 BLIN 将服务状态信息更新到本地系统中,为后续的协作集群的决策提供依据。

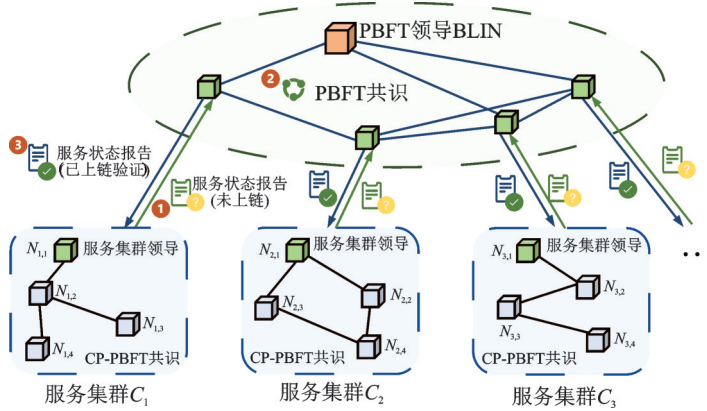


图 3 上层 SR-PBFT 共识协议流程

Fig.3 Upper-layer SR-PBFT consensus protocol

3 低空物联网协作集群链上同步状态时效性分析

3.1 链上服务状态信息年龄

如前文所述,在区块链增强的低空物联网可信协作架构下,协作集群的构建决策高度依赖于服务状态信息。然而,由于架构中引入了区块链多级共识协议,且存在异步工作时延,服务质量摘要在作为决策依据时可能已经“过时”^[14-15],使得 BLIN 对网络服务状态判断存在实时性问题,影响集群协作决策准确性及任务处理效率^[16-17]。本节将服务质量摘要“过时”问题抽象为两个低空智联节点 $N_{p,n}$ 和 $N_{p,q}$ 的服务质量摘要 AoI 随时间的变化,其中, $p = 1, 2, \dots, l, n; q = 1, 2, \dots, k$ 。

如图 4 所示, AoI 随时间的变化曲线表现出明显的阶梯状特征,整体可划分为若干个梯形区域。在

这些区域中,梯形 $Q_{p,q,z}$ 表示 $N_{p,q}$ 的第 z 个服务质量摘要的 AoI,时间轴上的投影则对应了前后两个轮次服务质量摘要上链的时间间隔,即服务质量摘要存在的时间,记为 $S'_{p,q,(z+1)} - S_{p,q,z}$ 而三角形 $R_{p,q,z}$ 区域在时间轴上的投影则对应了 $N_{p,q}$ 的第 z 个服务质量摘要从生成到完成 SR-PBFT 共识的时间跨度,记为 $U_{p,q,z} = S'_{p,q,z} - S_{p,q,z}$

令 $I_{p,q,z}^{\text{gen}}$ 为 $N_{p,q}$ 中连续两次服务质量摘要的生成时间间隔,且 $I_{p,q,z}^{\text{gen}}$ 在 $[(1-\delta)t_b, (1+\delta)t_b]$ 上均匀分布,同步误差 $\delta \in [0, 1]$ 。服务质量摘要的时间跨度 $U_{p,q,z}$ 与 $I_{p,q,z}^{\text{gen}}$ 无关且 $U_{p,q,z} (z \in \mathbb{Z}_+)$ 之间相互独立。由此,可定义 $I_{p,q}^{\text{gen}} = \{I_{p,q,z}^{\text{gen}}\}_{z \in \mathbb{Z}_+}$, $U_{p,q} = \{U_{p,q,z}\}_{z \in \mathbb{Z}_+}$, $Q_{p,q} = \{Q_{p,q,z}\}_{z \in \mathbb{Z}_+}$ 和 $P_{p,q} = \{P_{p,q,z}\}_{z \in \mathbb{Z}_+}$ 构成多个平稳随机过程。

综上所述, $N_{p,q}$ 在 $t (t \geq 0)$ 时的服务质量摘要 AoI 可由式(1)计算得出。

$$\Delta_{p,q}(t) = t - \max_{z \in \mathbb{Z}_+} \{S_{p,q,z} | S'_{p,q,z} \leq t\} \quad (1)$$

式中 $\max_{z \in \mathbb{Z}_+} \{S_{p,q,z} | S'_{p,q,z} \leq t\}$ 为 t 时刻前 $N_{i,j}$ 收到来自 $N_{p,q}$ 最近的服务质量摘要时间。

3.2 基于排队模型的链上状态时效

在区块链增强的低空智联网可信协作架构下, BLIN 在应用服务状态进行协作任务决策时,首先需对服务质量摘要的“过时”程度进行分析,接着应用服务质量摘要对 BLIN 任务开始前等候时长进行估算,最后通过服务决策算法对协作任务进行决策。因此,区块链增强的低空智联网可信协作架构中任务处理服务的效率不仅受 AoI 影响,还与任务开始前等候时长的估计和服务决策算法设计密切相关。本节首先介绍两个使用不同场景的任务开始前等候时长估计算法,并基于这两个算法给出服务质量摘要时效性指标。

由于 SR-PBFT 服务质量摘要生成特性,任意 BLIN 可能遭遇无法被集群中其他 BLIN 观测到的意外事件。因此, BLIN 服务系统可被建模为齐次 ($M/M/c$) 队列,且假设节点 $N_{p,q} (p = 1, 2, \dots, l; q = 1, 2, \dots, k)$ 的任务到达率为 $\lambda_{p,q}$ 的泊松过程,且任务分片服务过程时间服从均值为 $\mu_{p,q}^{-1}$ 的负指数分布。 $N_{p,q}$ 接收到来自 $N_{i,j}$ 服务质量摘要的 AoI 记为 $\Delta_{p,q}(t)$, t 为 $N_{i,j}$ 接收到用户请求的时间。由于 $M/M/c$ 队列存在时间齐次性,可记 $N_{i,j}$ 收悉 $N_{p,q}$ 最近服务状态为 $\alpha_{p,q}(0) \in \mathbb{Z}_0^+, \mathbb{Z}_0^+$ 为包含 0 及全体正整数的数集。假设 $\alpha_{p,q}(0) = x_{p,q}$, 其中 $x_{p,q}$ 为链上最近服务质量摘要的取值。相对应地,节点 $N_{p,q}$ 中任务分片数的实时值记为 $\alpha_{p,q}(\Delta_{p,q}(t))$, 它是一个相对于服务质量摘要 AoI 值 $\Delta_{p,q}(t)$ 的随机过程,且观察节点 $N_{i,j}$ 无法直接获取该值。

为获取 BLIN 服务质量摘要的可信度,本节定义:(1)基于 AoI 的任务开始前等候时长预测量记为 $L_{p,q}^q(\Delta_{p,q}(t))$; (2)直接使用服务质量摘要的时间预测量记为 $L_{p,q}^q(0)$ 。BLIN 服务质量摘要的时效性指标可由上述指标的差值进行估计。设 $x_{p,q}$ 为 $N_{p,q}$ 接收到的任务分片数,时效性指标可表示为

$$v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) = E[L_{p,q}^q(\Delta_{p,q}(t)) - L_{p,q}^q(0) | \alpha_{p,q}(0) = x_{p,q}] \quad x_{p,q} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad (2)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示数学期望。

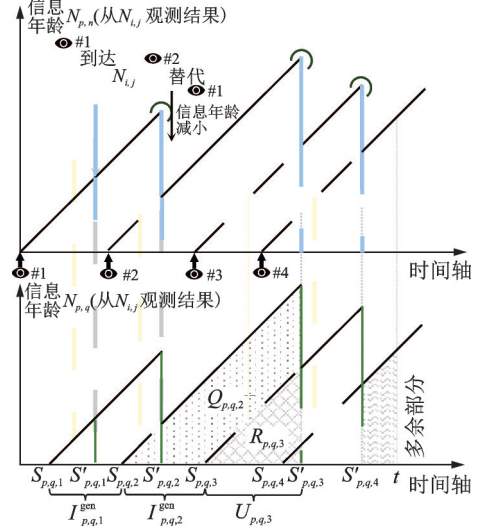


图4 服务状态报告信息年龄随时间变化关系
Fig.4 Aging of service status reports over time

假设 $N_{p,q}$ 的 $M/M/c$ 服务队列状态空间为 N 维,式(2)可展开化简如下

$$\begin{aligned} v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) = & \sum_{i=c_{p,q}}^{N-1} \text{Prob}\{\alpha_{p,q}(\Delta_{p,q}(t))=i|\alpha_{p,q}(0)=x_{p,q}\} E\left[L_{p,q}^q(\Delta_{p,q}(t))|\alpha_{p,q}(\Delta_{p,q}(t))=i\right] - \\ & E\left[L_{p,q}^q(0)|\alpha_{p,q}(0)=x_{p,q}\right] \end{aligned} \quad (3)$$

设存在 $i - c_{p,q}$ 个任务分片独立地存在于 $N_{p,q}$ 的服务等待队列中,此时 $N_{p,q}$ 的服务线程为全占用状态,此时新任务分片的平均任务开始前等候时长可等同于其他 $i - c_{p,q} + 1$ 个独立任务分片消耗时间之和,由此可推导出

$$E\left[L_{p,q}^q(\Delta_{p,q}(t))|\alpha_{p,q}(\Delta_{p,q}(t))=i\right] = \frac{i - c_{p,q} + 1}{c_{p,q}\mu_{p,q}} \quad (4)$$

$$E\left[L_{p,q}^q(0)|\alpha_{p,q}(0)=x_{p,q}\right] = \max\left\{\frac{x_{c,q} - c_{p,q} + 1}{c_{p,q}\mu_{p,q}}, 0\right\} \quad (5)$$

将式(4,5)代入式(3),可得到BLIN服务质量摘要的时效性展开式为

$$v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) = \sum_{i=c_{p,q}}^{N-1} \text{Prob}\{\alpha_{p,q}(\Delta_{p,q}(t))=i|\alpha_{p,q}(0)=x_{p,q}\} \frac{i - c_{p,q} + 1}{c_{p,q}\mu_{p,q}} - \max\left\{\frac{x_{c,q} - c_{p,q} + 1}{c_{p,q}\mu_{p,q}}, 0\right\} \quad (6)$$

为进一步化简 $P_i(\Delta_{p,q}(t)) = \text{Prob}\{\alpha_{p,q}(\Delta_{p,q}(t))=i|\alpha_{p,q}(0)=x_{p,q}\}$,需分析在随机时刻 t_1 ,节点 $N_{p,q}$ 任务分片数为 i 的概率,该概率与 t_0 状态有关,可记为

$$P_{p,q}(t_1) = P_{p,q}(t_0) e^{\mathbf{Q}_{p,q}(t_1 - t_0)} \quad (7)$$

此外,节点 $M/M/c$ 的队列长度状态转移矩阵可由 $\mathbf{Q}_{p,q} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 表示,令 $P_{p,q}(0)$ 表示节点 $N_{p,q}$ 节最近链上服务质量摘要中记录的服务状态, t 时刻节点 $N_{p,q}$ 的服务状态概率向量可表示为 $P_{p,q}(\Delta_{p,q}(t)) = P_{p,q}(0) e^{\mathbf{Q}_{p,q}\Delta_{p,q}(t)}$ 。

设 $\mathbf{h}_{p,q}$ 为一个 N 维系数向量, $\mathbf{h}_{p,q} = \left[0, \dots, 0, \frac{1}{c_{p,q}\mu_{p,q}}, \dots, \frac{N}{c_{p,q}\mu_{p,q}}\right]$ 。通过将 $P_{p,q}(t_0)$ 和 $\mathbf{h}_{p,q}$ 代入式(6)可得:当 $N_{i,j}$ 从链上获取的节点 $N_{p,q}$ 服务质量摘要经过共识导致的“过时”后 AoI 记为 $\Delta_{p,q}(t)$,该服务质量摘要实时时效性可被定义为

$$v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) = P_{p,q}(0) e^{\mathbf{Q}_{p,q}\Delta_{p,q}(t)} \mathbf{h}_{p,q}^T - \max\left\{\frac{x_{c,q} - c_{p,q} + 1}{c_{p,q}\mu_{p,q}}, 0\right\} \quad (8)$$

式中矩阵指数可表示为 $e^{\mathbf{Q}_{p,q}\Delta_{p,q}(t)} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} (\mathbf{Q}_{p,q}\Delta_{p,q}(t))^i$, 并且 $v(0, x_{p,q}) = 0$ 。

3.3 链上状态时效与协作计算效率关联

在时效性指标得到具体量化后,本节将探讨这一指标如何影响BLIN在估算任务开始前等候时长及在协作任务处理效率方面的作用。服务质量摘要的实时时效性指标,即 $v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q})$,反映了使用“过时”服务质量摘要的直接估计和基于服务质量摘要 AoI 的任务开始前等候时长预测两种度量间的差异程度。因此,时效性指标的正负反映了服务质量摘要的两种不同状态:

(1) $v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) \leq 0$ 时:在这种情况下服务质量摘要未“过时”,BLIN中新任务分片的实际任务开始前等候时长可能等于甚至小于预期估计值,这意味着BLIN的最近链上服务质量摘要仍是新鲜可用的,因此BLIN可直接使用服务质量摘要对BLIN的服务状态和任务开始前等候时长进行评估。

(2) $v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) > 0$ 时: 在这种情况下服务质量摘要已“过时”, 直接采用服务质量摘要可能会低估 BLIN 的任务开始前等候时长, 延误整个用户任务请求的处理进程。在这种情况下, 应采用基于状态 AoI 的链上状态修正算法。

4 低空物联网链上高效协作算法与策略设计

4.1 低空智联协作节点链上状态修正算法

算法 1 介绍了链上状态修正即 OSCA 的详细流程。该算法利用 BLIN 的实时 AoI 信息及服务质量摘要时效性来促进网络协作集群的构建。OSCA 首先计算 AoI 的值, 然后根据当前服务质量摘要实时时效性进行较为精确的等候时长估计。该算法在资源任务卸载及资源调配前, 对网络中收集的服务质量摘要进行分析, 可准确分析出服务质量摘要的可用性, 同时提供了更准确、更可靠的任务开始前等候时长估计, 提升最终协作任务的处理效率。

算法 1 OSCA

输入: 节点 $N_{p,q}$ 最新链上服务质量摘要中 $x_{p,q}$ 、 $\lambda_{p,q}$ 、 $\mu_{p,q}$ 、 $c_{p,q}$ 值, 其中 $p = 1, 2, \dots, l; q = 1, 2, \dots, k$, 当前时间为 t

输出: 全网 BLIN 等候时长集合 $\{\hat{L}_{p,q}^q\}, p = 1, 2, \dots, l; q = 1, 2, \dots, k$

- (1) for $p = 1$ to l do
- (2) for $q = 1$ to k do
- (3) $\Delta_{p,q}(t) \leftarrow t - \max\{S_{p,q,z} | S'_{p,q,z} \leq t, z \in \mathbf{Z}_+\}$
- (4) 计算 $\mathbf{Q}_{p,q}$ 、 $\mathbf{P}_{p,q}(0)$ 、 $\mathbf{h}_{p,q}$ 和 $v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q})$
- (5) if $v(\Delta_{p,q}(t), x_{p,q}) > 0$ then
- (6) $\hat{L}_{p,q}^q \leftarrow \mathbf{P}_{p,q}(0) e^{\mathbf{Q}_{p,q} \Delta_{p,q}(t) \mathbf{h}_{p,q}^T}$
- (7) else
- (8) $\hat{L}_{p,q}^q \leftarrow \max\{(x_{p,q} - c_{p,q} + 1) / (c_{p,q} \mu_{p,q}), 0\}$
- (9) end if
- (10) end for
- (11) end for

4.2 低空物联网高效链上协作集群构建策略

当接入源 BLIN 接收到用户发起的计算任务卸载请求后, 接入源 BLIN 将执行 OSCA 进行网络状态估算, 从而获得更为精准的全网 BLIN 预期任务计算开始前的等候时长集合 $\{\hat{L}_{p,q}^q\}$, 以此辅助更为高效的分配及集群构建决策。当新任务请求被接收后, 接入源 BLIN 将在执行 CP-PBFT 共识前, 使用 OSCA 的输出执行切割任务分片和构建协作集群两大关键操作:

(1) 切割任务分片: 为了充分利用集群的分布式计算优势, 接入源 BLIN 将任务切割成多个解耦的独立执行子任务分片, 以便任务在集群中的合理分配。假设协作的服务集群 BLIN 均来自同一设备制造商和运行商的同一型号, 即其具有相同的芯片结构和处理能力, 此时将任务请求切割为 k 个子任务分片的“等分”方案将是服务集群 BLIN 间用户请求任务工作分配的最佳方案。

(2) 构建协作集群: 接入源 BLIN 通过 OSCA 的输出, 也即任务开始前等候时长估计值集合 $\{\hat{L}_{p,q}^q\}$, 其中

$p=1, 2, \dots, l, q=1, 2, \dots, k$, 以此确定最佳的满足任务需求的 k 个协作 BLIN, 构建出协作服务集群。从等候时长估计值集合 $\{\hat{L}_{p,q}^q\}$ 中, 接入源 BLIN 可采用如下 3 种策略确定完成任务请求的 BLIN 集群。

① 随机选取策略: 接入源 BLIN 无视网络中存在的服务状态以及所有服务质量摘要的自身“过时”等问题, 直接从网络中所有 M 个参与 BLIN 中随机选取 k 个 BLIN 作为该任务请求的协作 BLIN 构成集群。

② 直接估计最优等候时长策略: 根据网络中 BLIN 提供的服务质量摘要, 不考虑“过时”情况, 而直接根据 $L_{p,q}^q(0)$ 值判别 BLIN 的任务开始前等候时长。接入源 BLIN 选择任务开始前, 等候时长最低的 k 个 BLIN 作为该任务请求的协作 BLIN 构成集群。

③ OSCA 预测最优等候时长策略: 采用 OSCA 获得预估任务开始前等候时长集合 $\{\hat{L}_{p,q}^q\}$, 接入源 BLIN 选取预估任务开始前, 等候时长最少的 k 个 BLIN 作为该任务请求的协作 BLIN 构成集群。

5 仿真结果与分析

为评估 OSCA 的实际效用, 本节针对 4.2 节中的直接估计法和 OSCA 协作策略进行仿真, 表 1 给出了默认的仿真参数。

表 1 默认仿真参数

Table 1 Default simulation parameters

参数	说明	默认值	参数	说明	默认值
a_{sr}	服务质量摘要报告的数据包大小	256 bit	f	BLIN 节点针对服务质量摘要的处理频率	10 兆周期/s
B	网络中 BLIN 节点间链路平均带宽	10 Mbit/s	γ	区块中哈希与签名等必要信息大小	256 bit
$c_{p,q}$	$N_{p,q}$ 节点最大并发服务线程数	[6, 8] 区间均匀分布	k	单个服务集群中 BLIN 数量	7 个 BLIN
δ	网络同步误差度	10%	l	网络中 BLIN 服务集群总数	4 个协作集群
M	网络中 BLIN 节点总数	14 个 BLIN	t_b	区块时间	1 s
$\mu_{p,q}$	$N_{p,q}$ 节点任务请求服务完成率	0.1 任务分片/s	$\rho_{p,q}$	任务到达 $N_{p,q}$ 节点的任务请求强度	$\sim \mathcal{N}(0.8, 0.01)$

首先, 图 5 通过变化不同的子任务分片到达强度, 也即请求强度 ρ , 展示了区块链增强的低空物联网可信协作架构与多组 BLIN 分立运行的独立服务架构在任务协作处理上的服务性能差异。 ρ 代表了整个网络中的 BLIN 提供服务的平均负载强度, 假设取 $\rho=0.5$, 则网络中的 $\rho_{p,q}$ 值将随机生成且符合 $\mathcal{N}(0.5, 0.01)$ 的正态分布。仿真结果显示, ρ 取值越大, 会造成子任务分片的执行前等候时长延长, 服务处理效率下降, 且区块链增强的低空物联网可信协作架构具有较大的性能优势。

图 6 展示了区块链增强的低空物联网可信协作架构中随 AoI 的增长情况, 在不同子任务分片到达强度、BLIN 任务负载条件下对时效性指标的影响。

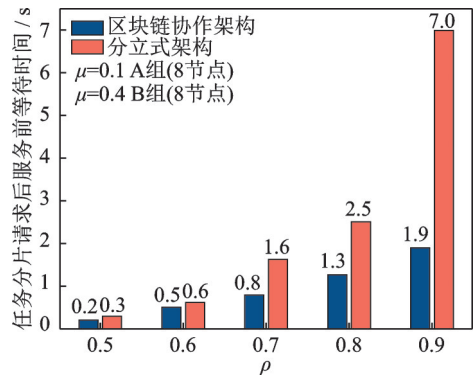
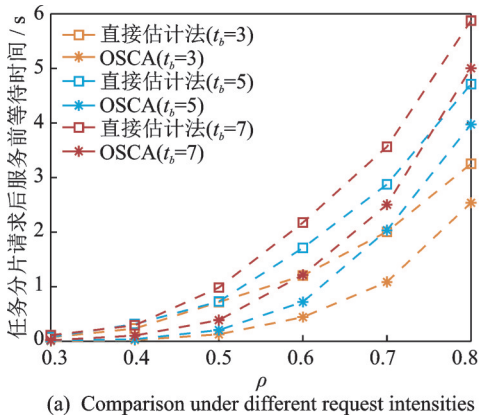


图 5 不同子任务分片请求强度下的可信协作架构性能变化

Fig.5 Performance of trustworthy collaboration architecture under different subtask request intensities

同时,从图中可以得出结论:(1)AoI增加并不一定导致服务质量摘要的时效性降低;(2)当子任务分片到达强度较大,队列中存在较多任务即BLIN任务负载较高时,AoI对服务质量摘要的时效性影响可忽略;(3)随着AoI的增长,服务质量摘要时效性在不同条件下存在先上升后下降、先下降后上升等多种变化趋势,揭示了实际系统中服务质量摘要“过时”现象的复杂性。

从图7中可看出,本文提出的OSCA与采用直接估计最优等候时长策略的直接估计法相比,能够降低任务计算开始前的等候时长,提升协作效率。同时,OSCA的优势随着子任务分片到达强度 ρ 的增加更加明显,验证了本文所提出的OSCA的有效性。此外,随着区块时间 t_b 的增加,任务开始前等候时长也随之增加。当 ρ 值较大时,任务开始前等候时长相对于 t_b 的增长率会有所提升,即高服务负载场景下的服务效率对于区块链增强的低空智联可信协作架构中链上服务质量摘要AoI更加敏感。



(a) Comparison under different request intensities

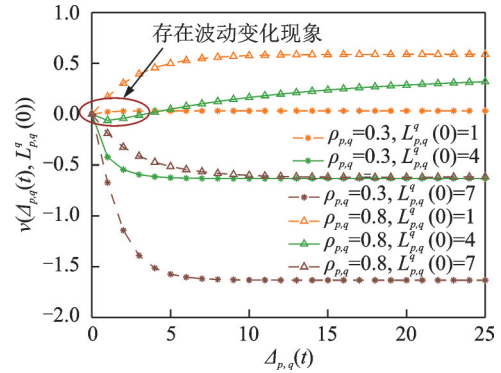
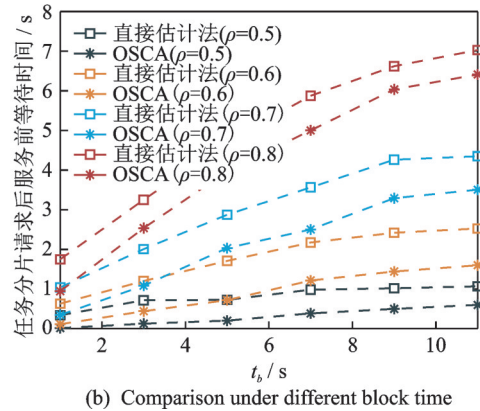


图6 AoI与服务质量摘要时效性指标的关系

Fig.6 Relationship between AoI and the timeliness of service quality summary



(b) Comparison under different block time

图7 不同子任务分片到达强度和区块时间下直接估计与OSCA性能对比

Fig.7 Performance comparison between direct estimation and OSCA under different request intensities and block time

图8考虑了实际网络状态对任务分片开始计算前等候时长的影响。如图8(a)所示,当网络同步误差增大时,网络的异步会导致协作网络的服务效率下降,开始计算前等候时长明显上升,然而OSCA算法能够始终保持相对于直接估计方法的领先优势。此外,网络带宽会影响区块传播时延,因此图8(b)对网络带宽的影响进行仿真,结果表明在相同的区块时间下,当网络带宽在2.5 Mb/s之上时,协作网络的性能不会受到显著影响。图8(c)中,考虑BLIN处理频率的影响,在区块时间较小时,更高的处理频率能够明显提升服务效率;区块时间较大时,增大处理频率对性能提升效果不明显。相较于同步误差、网络带宽和处理频率等参数,图8(d)中服务质量摘要大小的变化对任务分片开始计算前等候时长的影响具有特殊性,在不同区块时间大小条件下,增大服务质量摘要大小,都将降低网络性能。综上,应尽量降低低空智联BLIN之间的同步误差,在保障基础网络通信带宽同时增强BLIN处理能力,采用高效的服务质量

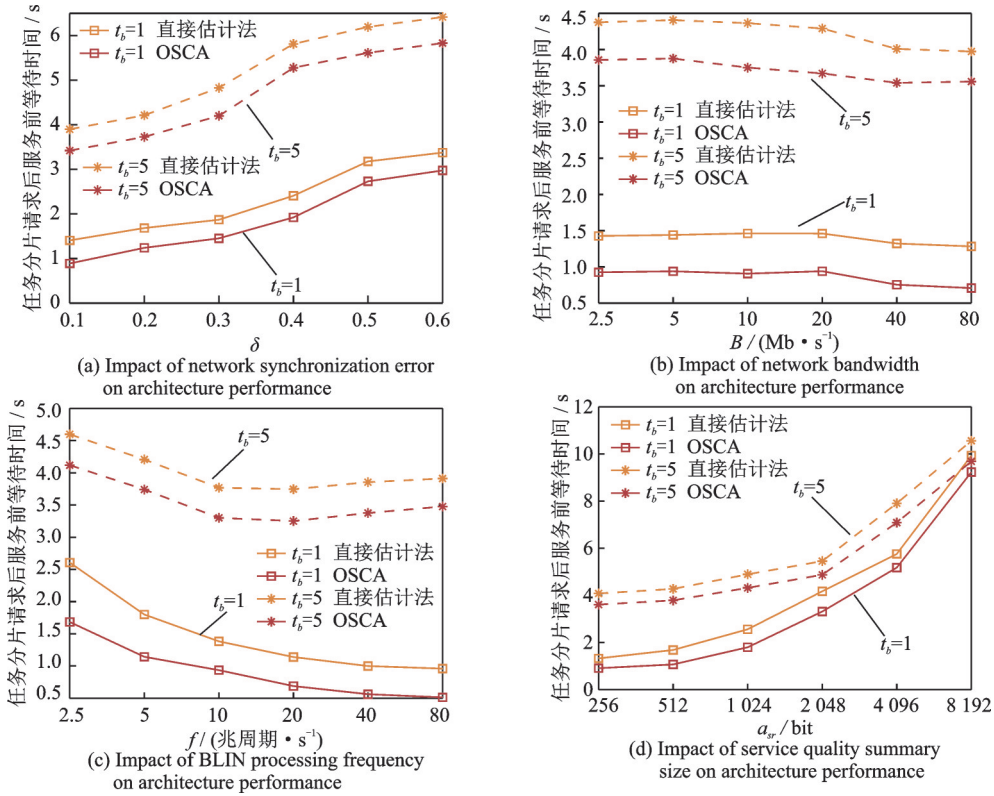


图8 不同参数对架构性能影响

Fig.8 Impact of different parameters on architecture performance

摘要表征以最大化提升链上可信协作计算服务集群协作效率。

6 结束语

本文设计了一种区块链增强的低空智能网可信协作架构,通过CP-PBFT和SR-PBFT组成的多级共识协议,统筹调度异构设备,构建安全高效的并行化低空智能网链上可信协作计算服务集群,该协议同时确保了网络中协作任务的可信定期同步与服务决策。此外,本文采用信息年龄AoI工具分析由区块链共识导致的服务质量摘要的“过时”问题,并设计OSCA来构建高效服务集群,避免因网络中存在的“过时”问题导致的网络状态误判。仿真结果表明,考虑服务质量摘要“过时”的OSCA所构建的链上可信协作计算服务集群相比直接估计大幅提升服务效率,降低任务计算前的等候时长,在低空智能网协作环境中维持高动态、高可用、低时延的计算资源统筹调度。在本文基础上,可进一步考虑针对低空智能网环境设计高效低能耗的区块链消息结构、智能合约等底层驱动机制,从而进一步提升可信协作架构的整体效率。

参考文献:

[1] 吴启晖,董超,贾子晔,等.低空智能网组网与控制理论方法[J/OL].航空学报,(2023-05-15)[2024-02-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20230512.1733.042.html>.
WU Qihui, DONG Chao, JIA Ziye, et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, (2023-05-15)[2024-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20230512.1733.042.html>.

- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] LING X, WANG J, LE Y, et al. Blockchain radio access network beyond 5G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(6): 160-168.
- [4] WANG J, LING X, LE Y, et al. Blockchain enabled wireless communications: A new paradigm towards 6G[J]. *National Science Review*, 2021, 8(9): 69.
- [5] JAVAID S, SAEED N, QADIR Z, et al. Communication and control in collaborative UAVs: Recent advances and future trends[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(6): 5719-5739.
- [6] 王心一, 陈志江, 雷磊, 等. 多无人机网络边缘智能计算卸载算法[J]. *数据采集与处理*, 2023, 38(6): 1286-1298.
WANG Xinyi, CHEN Zhijiang, LEI Lei, et al. Computation offloading algorithm for multi-UAV network based on edge intelligence[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2023, 38(6): 1286-1298.
- [7] TTRAN T X, HAJISAMI A, PANDEY P, et al. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(4): 54-61.
- [8] QIAO G, LENG S, ZHANG K, et al. Collaborative task offloading in vehicular edge multiaccess networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(8): 48-54.
- [9] DU R, GAO Y. DTC: A dynamic trusted collaboration architecture for mobile edge computing[C]//*Proceedings of Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable System Network Workshops*. Baltimore, MD, US: IEEE, 2022: 182-185.
- [10] TSCHORSCH F, SCHEUERMANN B. Bitcoin and beyond: A technical survey on decentralized digital currencies[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, 18(3): 2084-2123.
- [11] XUE H, CHEN D, ZHANG N, et al. Integration of blockchain and edge computing in Internet of things: A survey[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2023, 144: 307-326.
- [12] 吴诗平, 陈谋, 朱荣刚, 等. 基于区块链的多先进战机协同作战资源自适应调度[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(6): 1021-1029.
WU Shiping, CHEN Mou, ZHU Ronggang, et al. Resource adaptive scheduling of cooperative combat for multi-advanced fighters based on blockchain[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(6): 1021-1029.
- [13] 郭永安, 周沂, 王全, 等. 区块链辅助的多边缘服务器协作视频流缓存优化策略[J]. *数据采集与处理*, 2023, 38(6): 1353-1368.
GUO Yongan, ZHOU Yi, WANG Quan, et al. Blockchain-based collaborative caching for multi-edge server video streaming [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2023, 38(6): 1353-1368.
- [14] TANG Z, SUN Z, YANG N, et al. Age of information analysis of multi-user mobile edge computing systems[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Global Communications*. Madrid, Spain: IEEE, 2021: 1-6.
- [15] LIU Y, CHANG Z, MIN G, et al. Average age of information in wireless powered mobile edge computing system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 11(8): 1585-1589.
- [16] ROVIRA-SUGRANES A, RAZI A. Optimizing the age of information for blockchain technology with applications to IoT sensors[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(1): 183-187.
- [17] LEE S, KIM M, LEE J, et al. Is blockchain suitable for data freshness? An age-of-information perspective[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(2): 96-103.

作者简介:



乐煜炜(1995-),男,博士研究生,研究方向:移动通信系统与区块链技术, E-mail: ywle@seu.edu.cn。



江锐(1999-),男,博士研究生,研究方向:移动通信系统与区块链技术。



江毅恒(2000-),男,博士研究生,研究方向:移动通信系统与区块链技术。



王家恒(1978-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:移动通信系统与区块链技术, E-mail: jhwang@seu.edu.cn。